

Joni Jalkanen

Piirikorttien suunnitteluprosessin kehittäminen testauksen näkökulmasta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto

YAMK Sähkö- ja automaatiotekniikka

Opinnäytetyö

26.03.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Joni Jalkanen Piirikorttien suunnitteluprosessin kehittäminen testauksen näkökulmasta 33 sivua + 2 liitettä 26.03.2020
Tutkinto	Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto
Koulutusohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (YAMK)
Ohjaajat	Yliopettaja Heikki Valmu Senior Validation Engineer Mikko Karjalainen
<p>Yhä monimutkaisemmat piirikortit asettavat entistä kovempia vaatimuksia myös tuotantotestaukselle. Tuotantotestauksen suunnittelun sisällyttäminen osaksi piirikortin suunnitteluprosessia onkin erittäin tärkeää, jotta piirikortin testaus voidaan toteuttaa edullisesti, nopeasti ja kokonaisvaltaisesti. Tämän toimintatutkimuksen tavoitteena oli selvittää nykyisen piirikorttien suunnitteluprosessin haasteet ja kehitysmahdollisuudet, sekä luoda selkeitä kehitysehdotuksia, jotta tuotantotestaussuunnittelu saataisiin sisällytettyä entistä paremmin osaksi piirikorttien suunnitteluprosessia.</p> <p>Työssä käytetty aineisto perustui alan ammattikirjallisuuteen, katselmointimuistioihin, yrityksen sisäiseen dokumentaatioon sekä havainnointiin. Työn alussa tutustutaan erilaisiin piirikorttien tarkastus- ja testausmenetelmiin, sekä niihin liittyviin laitteistoihin. Toisessa osassa tehdään nykytilan selvitys, jonka aikana suunnitteluprosessissa havaittiin useita kehitysmahdollisuuksia. Viimeisessä osassa hahmotellaan kehitysehdotuksia prosessin parantamiseksi, sekä luodaan katsaus tulevaisuuden jatkokehitysmahdollisuuksille. Toimintatutkimuksen aikana luotiin useita kehitysehdotuksia suunnitteluprosessin parantamiseksi, joita lähdettiin viemään eteenpäin organisaatiossa.</p>	
Avainsanat	Tuotantotestaus, testattavuussuunnittelu, suunnitteluprosessi, prosessikehitys

Author Title	Joni Jalkanen Improving PCBA design process from testing perspective
Number of Pages Date	33 pages + 2 appendices 26 March 2020
Degree	Master of Engineering , MEng
Degree Programme	Master's Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Instructor	Mikko Karjalainen, Senior Validation Engineer Heikki Valmu, Principal Lecturer
<p>Today's more and more complex circuit boards set even more demanding requirements for the production testing. Therefore, it is even more important to include the testing planning as part of the circuit board design process to be able to create comprehensive PCBA testing fast and in an economic way. The aim of this thesis was to investigate the challenges and improvement opportunities of the current circuit board design process as well as finding ways to further improve the process.</p> <p>The used data consisted of professional literature, review memos, company's internal documents and observation. First part of the thesis handles different kinds of circuit board inspection and testing methods and equipment. Next the current design process status is analyzed and finally the improvement ideas for the observed improvement opportunities are collected. The created improvement tasks are being further worked inside the organization.</p>	
Keywords	Production testing, design for testability, design process, process improvement

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn tavoitteet	1
1.2	Tutkimuskysymykset	2
2	Piirikorttien tuotantovaiheet	2
2.1	Käsi- ja koneladonta	2
2.2	Komponenttien juotos	3
2.3	Manuaaliset kokoonpanovaiheet	3
2.4	Visuaalinen tarkastus	3
2.5	Piirikorttien testaus	4
2.6	Piirikorttien asennus kokoonpanoon	4
2.7	Toimitus asiakkaalle	4
3	Piirikorttien testaus	4
3.1	Piirikorttien testausmenetelmät ja -laitteistot	4
3.1.1	Visuaalinen tarkastus AOI ja AXI	4
3.1.2	In-circuit -testaus (ICT)	6
3.1.3	Boundary scan ja Built in self test (BIST)	7
3.1.4	Toiminnallinen testaus	9
3.2	Piirikorttien testaus osana suunnittelua	9
3.2.1	Design for test / Design for testability (DFT)	9
3.2.2	Testauksen hinta vs. romutuskulut vs. saavutettu hyöty	12
4	Prosessi	13
5	Piirikorttien suunnitteluprosessin nykytilan selvitys	14
6	Piirikorttien suunnitteluprosessin nykytilan haasteet	17
6.1	Tuotantotestaus osana piirikorttien suunnitteluprosessia	17
6.2	Testauksen vaatimusmäärittely	17
6.3	Testauksen toteutus	18
6.4	Testaus massatuotantovaiheessa	18
6.5	Testereiden ylläpito	18
7	Suunnitteluprosessin ja testausmäärittelyn kehittäminen	19

7.1	Testaus osana piirikortin vaatimusmäärittelyä	19
7.1.1	Testauksen huomiointi piirikaaviossa	20
7.1.2	Testauksen huomiointi osasijoittelussa	21
7.1.3	Testauksen huomiointi piirikortin toiminnallinen kuvaus -dokumentissa	22
7.2	Testauksen vaatimusmäärittely	23
7.2.1	Tuotantotestauksen vaatimusmäärittely ja protojen testaus	23
7.3	Tuotantotestausvaatimusten luonti	24
7.3.1	Visuaalinen tarkastus	24
7.3.2	Piirikortilla olevat teholähteet	24
7.3.3	Boundary Scan	25
7.3.4	Ohjelmointi	25
7.3.5	Muistit	25
7.3.6	Piirikortin sisäiset testausominaisuudet	25
7.3.7	Sisäiset ja ulkoiset rajapinnat	26
7.3.8	Moottorit	26
7.3.9	Laserit ja turvakytkimet	26
7.3.10	Merkkivalot	26
7.3.11	Muuta huomioitavaa	26
7.4	Hyväksyntärajojen asettaminen	27
7.5	Testerin suunnittelu, rakennus ja tuotantotestauksen toiminnallinen kuvaus	27
7.6	Ensimmäiset tuotantosarjat ja tuotantotestauksen katselmointi	28
7.7	Testauksen seuranta massatuotantovaiheessa	28
7.8	Tuotantotestauksen päivitys vanhojen tuotteiden kohdalla	28
7.9	Testilaitteiston ylläpito	29
8	Yhteenveto	29
8.1	Jatkokehitys	30
	Lähteet	32
	Liitteet	
	Liite 1. Piirikorttien tuotantotestauksen vaatimusmäärittely pohja	
	Liite 2. Piirikorttien tuotantotestauksen kuvaus dokumenttipohja	

1 Johdanto

Työ tehtiin Suomessa toimivalle röntgenlaitteita valmistavalle yritykselle, jonka palveluksessa olen työskennellyt jo usean vuoden ajan. Piirikorttien testaus ja etenkin testauksen määrittelyn tärkeys ovat tulleet esille päivittäisessä työssä useaan kertaan. Etenkin jo tuotannossa olevien piirikorttien ylläpitotehtävissä perusteellisesti tehty testauksen määrittely ja toteutuneen testauksen dokumentointi ovat erittäin tärkeitä. Yleisesti piirikorttien testausmäärittelyissä on parannettavaa, mutta niin on myös testauksen toteutuksen kuin testilaitteistojen dokumentoinnin kohdallakin. Piirikorttien testaus on erittäin tärkeä osa piirikorttien valmistusketjua. Viallinen piirikortti tulee sitä kalliimmaksi, mitä pidemmälle laitteen valmistusvaiheita se ehtii. Kaikkein kalleinta on havaita viallinen piirikortti asiakkaalla. Jotta piirikortti voidaan testata kokonaisvaltaisesti, edullisesti ja nopeasti, on piirikortin testaus otettava huomioon jo piirikortin suunnittelun alkuvaiheessa. Vaatimusmäärittely, piirikaavio, osasijoittelu ja testauksen vaatimusmäärittely ovat kaikki tärkeä osa kokonaisuutta. Mitä myöhemmin testauksen suunnittelu aloitetaan, sitä kalliimmaksi ja vaikeammaksi se muodostuu.

1.1 Työn tavoitteet

Kehittämistehtävän tavoitteena on selvittää nykyinen suunnitteluprosessin kulku, sekä miten piirikorttien tuotantotestaus on siinä huomioitu. Tämän jälkeen etsitään nykyisen prosessin kehitysmahdollisuudet sekä tunnistetaan keinoja piirikorttien tuotantotestausmäärittelyn parantamiseksi, että piirikorttitestauksen sisällyttämiseksi osaksi suunnitteluprosessia. Työ jakaantuu kahteen osaan, joista ensimmäisessä osassa tunnistetaan nykyisen prosessin haasteet, ja jälkimmäisessä osassa etsitään havaittuihin haasteisiin kehitysideoita. Kehittämistehtävän lopputuloksena saadaan aloitteita piirikorttien tuotantotestausmäärittelyn sekä suunnitteluprosessin kehittämiseksi, jotta piirikorttien testaus huomioidaan suunnittelun alusta lähtien.

Tässä raportissa käydään ensin yleisesti läpi piirikorttien tuotantoa ja erilaisia käytössä olevia testausmenetelmiä luvuissa 2 ja 3. Luvussa 4 luodaan yleiskatsaus prosessiin käsitteenä ja luvussa 5 tutustutaan nykyiseen suunnitteluprosessiin. Suunnitteluprosessin läpikäynnin jälkeen kappaleessa 6 eritellään havaitut haasteet ja luvussa 7 niihin etsitään erilaisia ratkaisumahdollisuuksia. Lopulta luvussa 8 luodaan yhteenveto tehdystä työstä sekä jatkokehitysmahdollisuuksista.

1.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksella haluttiin saada vastaus seuraaviin kysymyksiin: *Mitkä ovat nykyisen suunnitteluprosessin haasteet?* sekä *Miten piirikorttitesterit on määritelty?*, josta seuraa jatkokysymykset *Miten havaittuja haasteita voidaan korjata* sekä *miten piirikorttitesterit tulisi määritellä?*

Työ toteutetaan toimintatutkimuksena, jossa ensin selvitetään yrityksessä vallitseva tila, ja sen jälkeen kehitetään parannusehdotuksia teoriataustaan perustuen. Tutkimuksen tiedonkeruu perustuu alan kirjallisuuteen, yrityksen sisäisiin laatudokumentteihin, henkilöhaastatteluihin, kokousmuistioihin sekä havainnointiin.

Tämän toimintatutkimuksen kehitystuloksia voidaan havainnoida vasta myöhemmin, kun uudistettu prosessi on organisaatiossa omaksuttu ja ensimmäinen uudistetun prosessin mukaisesti toteutettu hanke valmistuu.

2 Piirikorttien tuotantovaiheet

Ennen piirikorttien testausta ja toimitusta piirikortin tilaajalle, kulkevat piirikortit tuotantolinjan läpi alla olevan kaavion mukaisesti.



Kaavio 1. Piirikorttien tuotantovaiheet [1; 3, kpl 40.1.2; 22] .

2.1 Käsi- ja koneladonta

Komponentit ladotaan piirikortille joko koneellisesti tai käsin. Tehoelektroniikan piirikorteissa on usein sekä pintaliitos- että läpiladottavia komponentteja, joista osa ladotaan usein käsin. Esimerkiksi jäähdytystä tarvitsevat komponentit asennetaan usein ensin jäähdytysileihin, jotka ladotaan tämän jälkeen piirikortille valmiina kokoonpanoina.

Digitaalikorteissa on nykyisin lähes pelkästään pintaliitoskomponentteja, jolloin ladonta tapahtuu täysin koneellisesti. Ennen pintaliitoskomponenttien ladontaa levitetään piirikortille juotospasta. Komponenttien asettelun ja juotospastan levityksen jälkeen voidaan piirikortti ajaa AOI (automatic optical inspection) -tarkastuksen läpi, jolloin varmistetaan komponenttien oikeasta sijoittelusta sekä juotospastan tasaisesta levittymisestä. [1; 3, kpl 40.1 – 40.3; 22]

2.2 Komponenttien juotos

Pintaliitoskomponentit juotetaan yleensä reflow-uunissa, mutta myös mm. laser- ja käsinjuotos ovat mahdollisia, jos komponentteja on vähän tai jos juotokselle on määritelty erityisvaatimuksia. Jos läpiladottavia komponentteja on paljon, ne juotetaan aaltojuotoksella. Jos läpiladottavia komponentteja on vähän, voidaan ne juottaa myös selektiivijuotoksella tai käsin. Juotoksille voi olla määritelty myös erityisvaatimuksia juotoslämpötilan tai juotoksen muodon suhteen. [1; 3, kpl 40.1 – 40.3]

2.3 Manuaaliset kokoonpanovaiheet

Manuaalisia kokoonpanovaiheita ovat mm. ruuvitornien asennus ja komponenttien liimaus piirilevyille. Manuaalisia kokoonpanovaiheita halutaan yleensä välttää, sillä ne nostavat piirilevykokoonpanon hintaa. [3, kpl 40.4; 22]

2.4 Visuaalinen tarkastus

Visuaalinen tarkastus voidaan tehdä joko manuaalisesti tai koneellisesti. Koneellinen AOI-tarkastus on nopea ja tehokas tapa tarkastaa komponenttien sijoittelu ja polariteetti. Myös juotoslaadun varmennus onnistuu sellaisilta komponenteilta, joissa juotokset ovat näkyvissä. Myös AXI (automatic x-ray inspection) eli röntgentarkastus on mahdollinen, jolloin myös mm. BGA -koteloisten komponenttien juotosten laatu sekä piirikortin alla piilossa olevien jäähdytysalueiden juottuminen voidaan tarkastaa. [1; 3, kpl 51.3, 53]

2.5 Piirikorttien testaus

Visuaalisen tarkastuksen jälkeen piirikortit testataan sähköisesti. Nykyisin piirikorttien testaus tapahtuu lähes yksinomaan siihen tarkoitettuun testilaitteistossa, jossa piirikorttiin liitytään piikkipedin välityksellä. Tällöin myös mm. FPGA-piirien sisäinen toiminta voidaan testata kattavasti boundary scan -menetelmällä.

Vanhoja piirikortteja testataan myös kokonaista loppulaitetta vastaavilla testipöydillä. Tällainen testaus on kuitenkin piikkipetitestaukseen nähden hidasta, eikä esimerkiksi FPGA -piirien sisäistä toimintaa pystytä testaamaan kattavasti. [1; 3, kpl 55]

2.6 Piirikorttien asennus kokoonpanoon

Testauksen jälkeen piirikortit voidaan asentaa seuraavaan osakokoonpanoon tai niihin voidaan asentaa esimerkiksi kaapeleita ja tarroja. [22]

2.7 Toimitus asiakkaalle

Lopulta valmiit ja testatut piirikortit tai kokoonpanot toimitetaan asiakkaalle. Yksittäiset piirikortit toimitetaan joko erillisissä ESD-pakkauksissa tai useamman piirikortin ESD-laatikoissa. [22]

3 Piirikorttien testaus

3.1 Piirikorttien testausmenetelmät ja -laitteistot

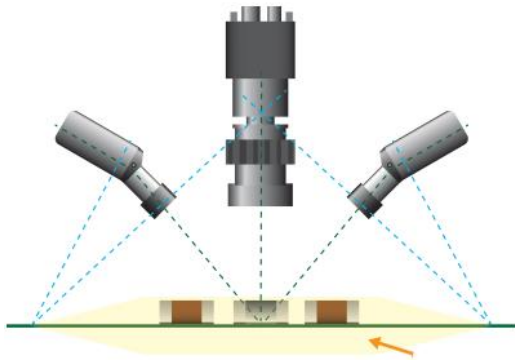
Tässä luvussa käydään pintapuolisesti läpi erilaisia piirikorttien tarkastus- ja testausmenetelmiä sekä niihin käytettäviä laitteistoja.

3.1.1 Visuaalinen tarkastus AOI ja AXI

Visuaalinen tarkastus tehdään nykyisin pääsääntöisesti automaattisesti. Manuaalisella tarkastuksella tarkistetaan lähinnä suurien komponenttien polariteetti tai esimerkiksi jäähdytyssiilien asemointi.

Automaattinen optinen tarkastuslaitteisto (AOI, Automatic Optical Inspection) käyttää yhtä tai useampaa kameraa ja valonlähdettä piirilevyn pinnan tarkastamiseen.

Kamerasta saadaan 2D kuva, mutta useammalla kameralla ja kulmalla voidaan luoda 3D-kokonaisuus. [2]



Kuva 1. Useita kameroita käyttämällä voidaan kuvattavasta kohteesta luoda 3D-malli. [2]



Kuva 2. MEK PowerSpector AOI-laitteen kamerapää, sekä esimerkki eri suunnista kuvatusta palakomponentista. [2]

AOI-laitteistolla voidaan tarkastaa piirilevy heti ladonnan ja pastan levityksen jälkeen ennen juotosprosessia, mutta myös esim. passiivi- ja aktiivikomponenttien ladonta vaiheiden välissä. Tällöin tarkastetaan ensin passiivikomponenttien ladonta, ja tämän jälkeen tiheäjalkaisten komponenttien pastan laatu. Ladontavirheiden tunnistamisen lisäksi järjestelmällä voidaan seurata ladontalaitteiston suorituskykyä ja saada hälytys riittävän ajoissa, jotta ladontavirheitä ei ehdi syntyä.

[3, kpl. 53.9]

Juotosprosessin jälkeinen AOI vaatii usein hieman kehittyneemmän laitteiston, sillä etenkin läpiladottavien komponenttien juotosten tarkastus on vaativaa.

AOI ei pysty tarkastamaan komponenttien alla olevia juotoksia tai hyvin tiheiden komponenttien juotoksia, vaan tätä varten tarvitaan röntgentarkastuslaitteisto.

[3, kpl 53.10]

Röntgenlaitteiston avulla on mahdollista tarkastaa juotoslaatu myös silloin, kun juotokset eivät ole näkyvillä. Röntgensäteiden ominaisuuksia ja suodatusta voidaan säätää niin, että halutut metallit korostuvat kuvassa. Näin esimerkiksi piirilevyn kuparivedot tai komponenttien jalat eivät näy kuvassa, mutta juotokset näkyvät selkeästi. Läpivalaisun avulla nähdään myös juotoksen sisään, jolloin mm. ilmakuplat tai onkalot voidaan havaita. [4]

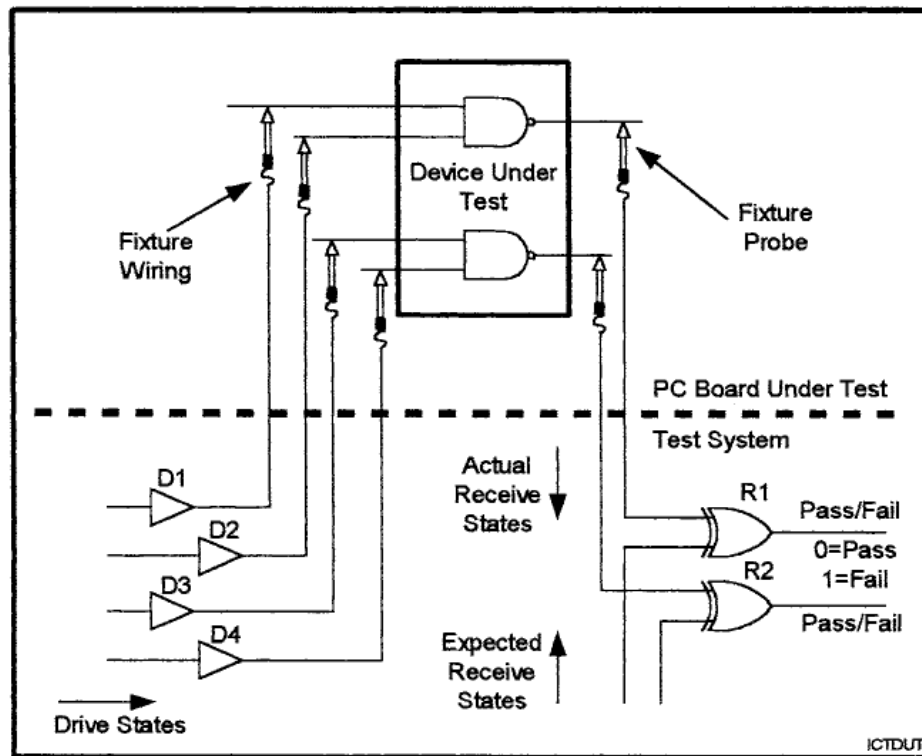
3.1.2 In-circuit -testaus (ICT)

In-circuit -testauksessa testauslaitteisto liittyy piirikorttiin joko testipisteiden, komponenttien tai liitinten kautta. Myös flying probe -tekniikka on mahdollinen. Tällöin liikuteltavilla neuloilla liitytään vain tiettyihin pisteisiin kerrallaan. Flying probe -testaus on piikkipetiin nähden hidas, mutta ei tarvitse erillistä neulapetiä. Testauksessa voidaan mitata mm. komponenttiarvoja (resistanssi, kapasitanssi), havaita oikosulkuja sekä testata virtalähteiden, analogisten ja digitaalisten kytkentöjen toimintaa. Flying probe -testaus soveltuu hyvin proto-sarjojen testaukseen, sillä sen käyttöönottokulut ovat pienet verrattuna piikkipetiin.

Analogisessa testauksessa korttia ei aluksi tarvitse sähköistää, vaan komponenttien arvot ja oikosulut voidaan mitata testauslaitteiston syöttämällä pienellä mittausjännitteellä. Tämän jälkeen kortti voidaan sähköistää ja mitata mm. virtalähteiden toiminta.

Digitaalisessa testauksessa kortti sähköistetään, jotta digitaalipiirien toiminta voidaan testata. Piirien sisääntuloon syötetään testeriltä tunnettu heräte ja piirien ulostulosta mitataan vaste.

[3, kpl 53 – 55]



Kuva 3. Digitaalinen in-circuit -testaus. [3, kuva 55.9]

3.1.3 Boundary scan ja Built in self test (BIST)

Boundary scania tukevien piirien sisäinen toiminta, sekä kommunikointi muiden kortilla olevien piirien kanssa voidaan testata JTAG-väylän kautta. Piireissä on kaksi toimintatilaa: normaalitila sekä testaustila. Testaustilassa voidaan syöttää ja lukea testikuvioita, joiden avulla piirin toiminta voidaan varmentaa.

3.1.4 Toiminnallinen testaus

Toiminnallinen testaus voidaan suorittaa joko liittymällä kortin testipisteisiin tai liittimiin kuten in-circuit -testauksessakin. Toiminnallinen testaus voidaan myös suorittaa erikseen sitä varten tehdyssä testausympäristössä, joka koostuu usein myös muista kohdelaitteen piirikorteista ja ohjelmistoista. In-circuit, toiminnallinen testaus sekä boundary scan testaukset tehdään nykyisin yleensä yhdellä yhdistelmätesterillä. Toiminnallisessa testauksessa testattava kortti sähköistetään ja siihen syötetään sen luonnollisessa käyttöympäristössä esiintyviä heräitteitä, sekä mitataan kortilta tulevia vasteita. [3, kpl 54, 55;]

3.2 Piirikorttien testaus osana suunnittelua

Massatuotannossa on tärkeää, että mahdollisimman suuri osa testauksesta on automatisoitu. Automaattinen tarkastus on manuaalista tarkastusta nopeampaa ja yleensä myös tarkempaa, jonka lisäksi testaus on toistettavissa. Massatuotanto on kokonaisuudessaan optimoitu mahdollisimman nopeaksi, mikä asettaa vaatimuksia myös kortin suunnittelulle testauksen osalta. Jotta piirikortti on edullinen, mutta korkealaatuinen, on testaus otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

3.2.1 Design for test / Design for testability (DFT)

Testattavuuden merkitys on kasvanut huomattavasti viime vuosikymmeninä, kun piirikortit ovat muuttuneet entistä monimutkaisimmiksi ja komponenttien määrä on kasvanut tuhansiin komponentteihin. Nykyaikaista monimutkaista korttia ei ole taloudellisesti järkevää testata ainoastaan toiminnallisella testauksella. Myöskään ainoastaan neulapetiin perustuva in-circuit -testaus ei ole mielekäästä, sillä kortilla on tuhansia liityntäkohtia, jotka jokainen vaativat oman kontaktineulan. Tämän lisäksi sekä kattavan ICT -testausohjelman tekeminen, että testausohjelman ajaminen ovat aikaa vievää. Toisaalta yhä useamman IC-piirin juotospisteet ovat komponentin alla piilossa, jolloin AOI-tarkastus ei havaitse juotosvirheitä.

Testattavuus on piirikortin ominaisuus, joka mahdollistaa kattavan testauksen kehittämisen helposti ja kustannustehokkaasti. Piirikortilla on hyvät testattavuusominaisuudet silloin, kun testaus on otettu huomioon jo piirikortin suunnitteluvaiheessa eli kortti on suunniteltu testattavaksi.

Yleensä eri testit havaitsevat osin päällekkäisiä vikoja, mutta toisaalta kaikkia ominaisuuksia ei saada testattua. Esimerkiksi sekä AOI, AXI että ICT -testaus havaitsevat oikosulkuja, mutta eivät testaa FPGA-piirin sisäistä toimintaa.

Päällekkäiset testit mahdollistavat testauksen tehostamisen ja ovatkin oivia säästökohteita. Testaamattomat ominaisuudet taas lisäävät niin myöhempien kokoonpanovaiheiden kuin asiakkaiden havaitsemien vikojen riskiä.

Röntgentarkastuksella saadaan nopeasti selville juotosviat. Kattava AXI-testaus tekee ICT-testauksesta huomattavasti yksinkertaisempaa ja nopeampaa, sillä ICT-testauksen ei enää tarvitse havaita oikosulkuja tai avoimia piirejä.

[3 kpl 53-55; 6]

Design for test eli piirikortin testattavuussuunnittelu liittyy niin komponenttien sijoitteluun, etäisyyksiin kuin muihin mekaanisiin, sähköisiin että ohjelmallisiin ominaisuuksiin. Testaussuunnittelu alkaa piirikortin vaatimusmäärittelystä.

Testauksen kannalta on huomioitava ainakin alla olevat seikat:

- Mahdollisimman monelle komponentille tulisi käyttää samanlaisia juotoskuvioita, jolloin sama kontaktineula käy mahdollisimman monelle eri komponentille.
- Kaikki testipisteet sijoitetaan kortin samalle puolelle.
- Tukitapeille tulisi jättää tilaa, jotta kortti saadaan painettua tasaisesti neulapetiä vasten. Tukitappeja tarvitaan useampia alueilla, joissa on paljon testipisteitä
- Testipisteet tulisi jakaa mahdollisimman tasaisesti kortin yhdelle puolelle, jotta neulapedin paine olisi mahdollisimman tasainen.
- Sekä komponenttien, että testipisteiden tulisi olla vähintään 2,5mm etäisyydellä toisistaan ja testipisteen halkaisijan olisi oltava riittävän suuri käytettyyn testineulaan nähden, yleensä vähintään 1,25mm.
- Piirikortin testipadien puolelle tulisi sijoittaa vain mahdollisimman matalia komponentteja, jotta testipisteisiin liittyminen on mahdollisimman helppoa.
- Piirikortille tulisi sijoittaa paljon käyttöjännite- ja etenkin maatestipisteitä, jotta nollataso saadaan mahdollisimman läheltä mitattavaa signaalia. Tällöin käyttöjännitteiden virta jakakantuu useamman testipisteen ja kontaktineulan kesken.

- Jokaiselle verkolle tulisi luoda oma testipiste ja se tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle signaalin lähdettä.
- Ohjelmoitaville ja hallittaville piireille tulisi sijoittaa omat huoltoliittimet.
- Piirikortilla olisi myös oltava vähintään kolme paikoitusmerkkiä kortin nurkissa (alignment mark), jotta piirilevy saadaan asemoitua oikein AOI- ja AXI-testauksessa.
- Piirien ohjaussignaalit sekä ylösvedot tulisi viedä vastusten läpi (esim. chip enable), jolloin niitä voidaan ohjata testerissä itsenäisesti.
- JTAG-laitteet tulisi ketjuttaa. Joka JTAG-laitteelle asetetaan testipisteet TDI-, TDO-, TCLK- ja TMS- pinneille. 0 ohm jumpperivastus voidaan liittää JTAG-bypass pinniin. Vastusta ei kalusteta, mutta juotospisteisiin voidaan liittyä testerillä.
- Käyttämättömät IC-pinnit tulisi yhdistää vastuksen kautta käyttöjännitteisiin, jolloin niihin voidaan liittyä testerissä. Tällöin JTAG-piirien osalta voidaan käyttää valmiita JTAG -kirjastosta löytyviä testejä ilman erillistä ohjelmointia.
- Ulkoinen kello tulisi ajaa bufferin tai ANDin läpi, jolloin sitä voidaan hallita testauksessa.
- Suunnittelijan tulisi selvittää toimiiko piirikortti oikein testerissä, jos sen laiteohjelmisto ei ole käynnistynyt. Tämä koskee etenkin boundary scan ja kortin sisäisiä testejä.
- Suunnittelijan tulisi myös selvittää kuinka herkästi kortin käynnistys häiriintyy, jos testipisteitä luetaan piirikortin käynnistymisen aikana.
- Tulisi myös selvittää tuleeko kortilla virheitä, jos se ei ole käynnistettäessä kiinni emolaitteessa, sekä estääkö se kortin käynnistymisen loppuun tai esim. boundary scannin -testin toiminnan.
- Kortilla tulisi olla merkkivaloja tai signaaleja joiden tilasta voidaan päätellä, onko kortti käynnistynyt.

[3; 7; 8; 14]

Komponenttien asettelu voidaan tarkastaa automaattisella optisella tarkastuslaitteistolla (AOI) sekä jossain määrin myös läpivalaisulaitteistolla (AXI). Jos komponentit ovat liian lähellä toisiaan, tai jos pienet pintaliitoskomponentit ovat suurien komponenttien vieressä, ei niitä nähdä joka suunnasta AOI-tarkastuksessa. [9]

Myös IC-piirien käyttämättömille yksiköille on hyvä olla testipisteet ja/tai ylös veto/alas veto vastuksen läpi, jolloin myös ne voidaan testata, tai piirin toiminta

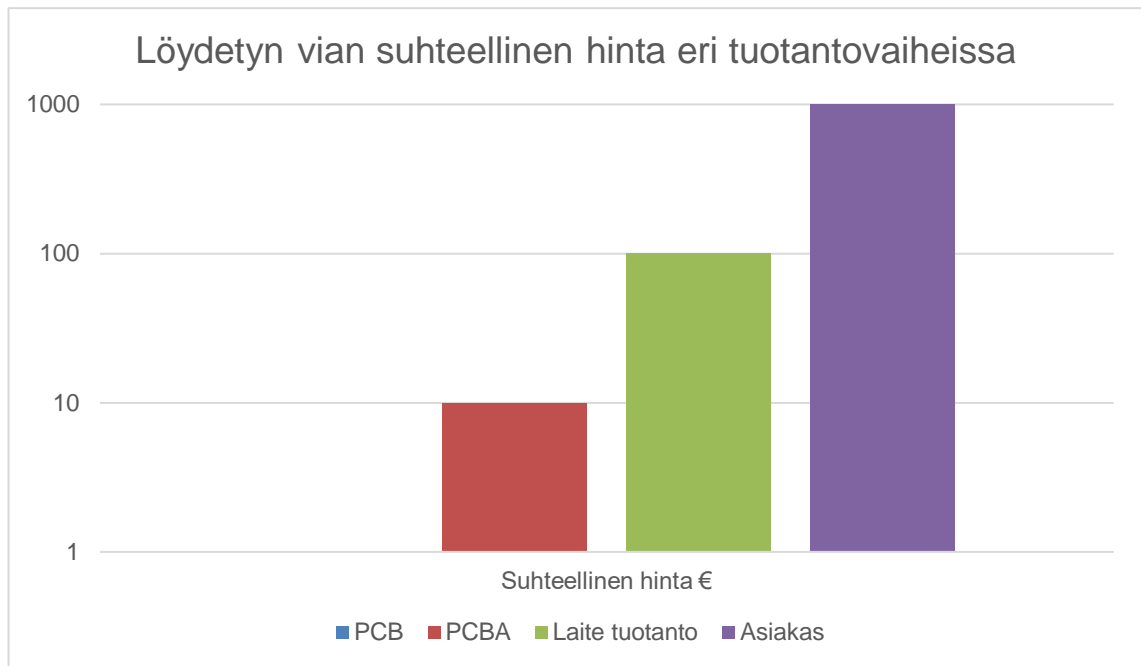
voidaan todentaa ainoastaan näitä testaamalla, jolloin käytössä olevien yksiköiden testaus ei häiritse kortin muuta toimintaa. [8]

3.2.2 Testauksen hinta vs. romutuskulut vs. saavutettu hyöty

Testaus on sitä kalliimpaa, mitä huonommin kortti on testauksen kannalta suunniteltu. Testattavaksi suunniteltu piirikortti ja huolellisesti suunniteltu testaus pienentävät testauksen alkuinvestointiin tarvittavaa pääomaa. Tämän lisäksi testaus on nopeaa ja täten edullista massatuotannon kannalta. Etenkin toiminnallinen testaus on hidasta, ja kallista. Vaikka esim. AXI-laitteisto on AOI-laitteistoon verrattuna kallis, sillä voidaan osittain korvata hitaita sekä alkuinvestoinniltaan kalliita ICT-testejä. AOI- ja AXI-laitteistot eivät ole sidottu vain yhteen piirikorttiin vaan niitä voidaan käyttää useille eri tuotteille. [3 kpl 54.4 - 55.3; 6; 10; 11; 12]

On kustannustehokasta havaita viat mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Näin ollen on tärkeää, että testauksen kattavuus on korkea jo tuotannon alkuvaiheessa. Mitä monimutkaisempi kortti on kyseessä, sitä suuremmat romutuskustannukset aiheutuvat, jos vikoja ei havaita tarpeeksi ajoissa. Vialliset piirikortit on sitä helpompi korjata, mitä aiemmassa tuotantovaiheessa vika on havaittu. Suurimmat kulut aiheutuvat kuitenkin, jos viallisia tuotteita pääsee lopputuotteen tuotantolinjalle tai asiakkaille asti. Jos testauksen jälkeen korteista on viallisia 2%, ja tällaisia kortteja on lopputuotteessa 10 kpl, on loppukokoonpanon jälkeen 33% mahdollisuus, ettei tuote toimi. Tämän takia on tärkeää, että testaus on kattava ja testatuista korteista vähintään 99% on toimivia. Monimutkaisen kortin saanto, jolla on noin 500 komponenttia ja yli 4000 juotospistettä, voi olla vain alle 40%, jolloin tuhannen kortin vuosimäärälläkin romutuskulut ovat useita satoja tuhansia euroja. [3 kpl 55.3; 6 s.2-4, 7-8; 11; 13]

Alla olevasta kaaviosta nähdään, että löydetyn vian aiheuttama kustannus kasvaa voimakkaasti tuotannon edetessä:



Kaavio 2. Vaaka-akselilla on piirikortin eri tuotantovaiheet. Pystyakselilla suhteellinen hinta. [3. kappale 36.3, kaavio 36.1]

4 Prosessi

Prosessi on toimintaa, jolla on selkeä alku ja loppu ja joka toistetaan aina saman kaavan mukaisesti. Prosessissa siihen syötetyt syötteet muuttuvat tuotteiksi, joten prosessilla on siis selvä tarkoitus. Prosessin kehittämisellä tavoitellaan yleensä toiminnan tehostamista, laadun parannusta sekä toiminnan yhtenäistämistä. Myös tämän työn tavoitteena on sekä tehostaa suunnitteluprosessia, parantaa sekä piirikorttien että testauksen laatua, että yhtenäistää toimintatavat yhtiön sisällä. Prosesseja muutettaessa ei kannata kuitenkaan muuttaa liikaa kerralla ja muutoksiin on yleensä varattava runsaasti aikaa, jotta koko organisaatio ehtii mukautua muutoksiin. Seuraavassa kappaleessa on kuvattu nykyinen suunnitteluprosessi kehityskohteiden löytämiseksi. [15; 16; 17 s. 8, 10-14]

5 Piirikorttien suunnitteluprosessin nykytilan selvitys

Tässä kappaleessa käydään läpi nyt käytössä oleva piirikorttien suunnitteluprosessi, tuotantotestauksen määrittely, testereiden ylläpito sekä haasteet.

Piirikortin suunnittelu alkaa siitä, että hankkeella on tarve toteuttaa jokin toiminto, joka on määritelty järjestelmän vaatimusmäärittelyssä. Vaihtoehtoisesti jo tuotannossa olevan tuotteen kohdalla tarve voi tulla myös kiristyneistä viranomaisvaatimuksista, tuotantokustannusten alentamisen tarpeesta tai markkinoilta poistuneiden komponenttien korvaamisesta. [21, s. 8, 22]

Piirikortin suunnittelu alkaa aloituspalaverista, jonka piirikortin pääsuunnittelija ja projektipäällikkö järjestävät. Palaverin tarkoituksena on tiedottaa kaikkia osapuolia suunnittelun aloituksesta sekä varmistaa resurssit ja osapuolien roolit. [21, s. 8]

Varsinainen suunnittelu alkaa piirikortin vaatimusmäärittelyn suunnittelulla. Piirikortin suunnittelija valmistelee vaatimusmäärittelyn tiiviissä yhteistyössä projektipäällikön, laiteohjelmistosuunnittelijoiden, mekaniikkasuunnittelijoiden ja muiden asianomaisten kanssa. Tässä vaiheessa luodaan riittävät vaatimukset, jotta piirikortin piirisuunnittelu voidaan aloittaa. Kaikki riskianalyysiin ja suorituskykyyn liittyvät toiminnot tulee kattaa vaatimusmäärittelyssä. Prosessin myöhemmässä vaiheessa piirikortti testataan tässä vaiheessa tehtyjä vaatimuksia vasten. Piirikortin suunnittelun aikana voi tulla esiin uusia vaatimuksia, tai joitain vaatimuksia voidaan joutua muuttamaan teknisten rajoitusten vuoksi. Käytännössä piirikortin suunnittelu sisältää samanaikaisesti sekä määrittelyn että piirikaavion ja osasijoittelun tekoa. [21, s. 9-10]

Ensimmäinen versio vaatimusmäärittelystä katselmoidaan hankkeen osapuolten toimesta ennen piirikaaviosuunnittelun aloittamista. [21, s. 10]

Seuraavassa vaiheessa aloitetaan piirikaaviosuunnittelu. Tavoitteena on luoda tai muuttaa olemassa olevaa piirikaaviota, jotta piirikortin vaatimusmäärittelyn vaatimukset täytetään. Tämän prosessivaiheen tuloksena syntyy piirikaavio sekä piirikortin komponenttirakenne PDM-järjestelmään (product data management eli tuotetiedon hallinta). Samalla luodaan myös ensimmäinen versio piirikortin toiminnallinen kuvaus - dokumentista, joka kuvaa piirikortin ominaisuuksia ja toimintaa. [21, s. 10-11]

Tämän jälkeen piirikaavio katselmoidaan, jolloin varmistetaan, että piirikaavio täyttää piirikortin vaatimusmäärittelyssä asetetut vaatimukset, on yrityksen laatudokumenttien mukainen ja että piirikaavio on tehty huolellisesti hyviä suunnittelusääntöjä noudattaen. [21, s. 11-12]

Piirikaavion luonnin jälkeen aloitetaan osasijoittelun tekeminen. Tuloksena syntyy osasijoittelu tiedostoja PDM-järjestelmään, jolloin piirikortista on olemassa kaikki tiedostot, jotka tarvitaan ensimmäisen protosarjan tilaukseen. Piirikortin toiminnallinen kuvaus päivitetään tarpeen mukaan, jonka jälkeen osasijoittelu katselmoidaan ja ensimmäiset protolevyt voidaan tilata. Tähän mennessä ei vielä ole vaadittu mitään toimia piirikortin testattavuuden osalta, sillä piirikortin vaatimusmäärittely tai prosessi eivät vaadi testauksen huomioimista piirikortin vaatimusmäärittelyssä. [21, s. 12-13]

Piirikortin verifiointin suunnittelu aloitetaan viimeistään tässä vaiheessa. Verifiointi tarkoittaa todentamista, jolla varmistetaan, että tuote vastaa sille asetettuja vaatimuksia. Yleensä verifiointin suunnittelu voidaan aloittaa jo vaatimusmäärittelyn hyväksymisen jälkeen. Piirikortin suunnittelija luo verifiointisuunnitelman, jolla piirikortti verifioidaan piirikortin vaatimusmäärittelyssä olevien vaatimusten täyttymisen varmistamiseksi. Suunnittelija voi sisällyttää verifiointiin myös vaatimusmäärittelyn ulkopuolisia testejä erityisesti protosarjan verifiointia varten, jotka tuottavat lisäarvoa piirikortin toiminnan varmistamiseksi. Myös verifiointisuunnitelma katselmoidaan. [21, s. 13-15; 23]

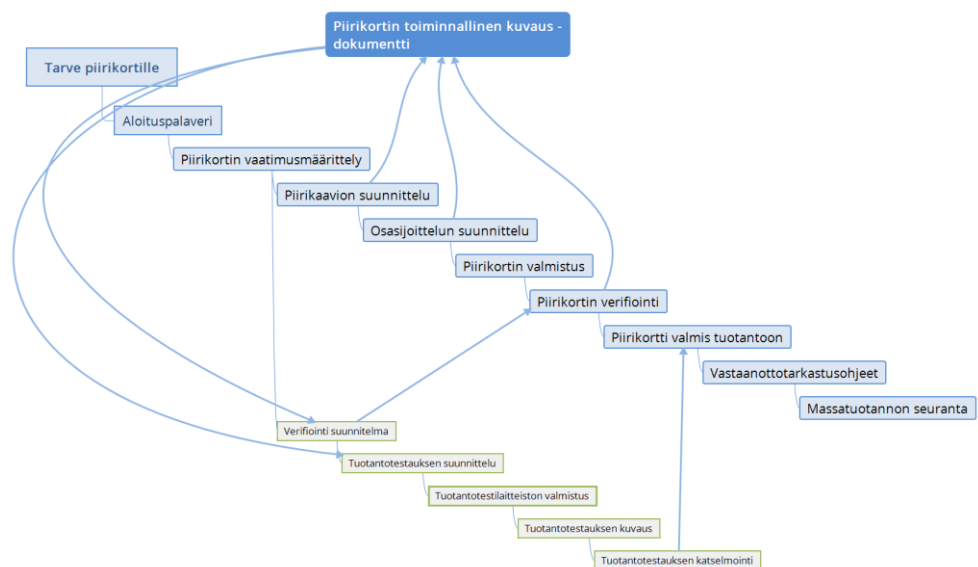
Kun piirikortit saapuvat valmistuksesta, voidaan aloittaa verifiointi. Kortit verifioidaan vaatimusmäärittelyä vasten verifiointisuunnitelman mukaisesti. Nyt piirikortin tulisi olla jo versiohallinnan piirissä PDM-järjestelmässä. Jos piirikortti ei läpäise verifiointia, siitä luodaan uusi versio PDM-järjestelmään, ja dokumentteihin tehdään tarvittavat muutokset. Tämän jälkeen verifiointi toistetaan. Tarvittaessa myös verifiointisuunnitelmaa voidaan muuttaa. Piirikortin toiminnallinen kuvaus -dokumentti viimeistellään prosessin tässä vaiheessa. Verifiointin jälkeen verifiointiraportti katselmoidaan. [21, s. 15-16]

Vasta verifiointin jälkeen aloitetaan tuotantotestauksen suunnittelu. Piirikortin suunnittelija luo testaukselle vaatimusmäärittelyn yhteistyössä piirikorttitoimittajan kanssa. Tuotantotestauksen suunnittelulle ei vaadita viitteitä järjestelmän tai piirikortin vaatimusmäärittelyn vaatimuksiin, piirikortin toiminnallisen kuvauksen -dokumenttiin tai piirikortin verifiointisuunnitelmaan. [21, s. 16-17]

Tuotantotestauksen vaatimusmäärittely katselmoidaan, jonka jälkeen tuotantotestauslaitteiston suunnittelu ja valmistus aloitetaan piirikorttitoimittajalla, tai kolmannella osapuolella. Testilaitteiston valmistuttua laitteistosta tehdään laitteen toimintaa kuvaava tuotantotestauksen kuvaus -dokumentti, jossa on myös käytössä olevat testauksen hyväksyntäraajat. Tuotantotestauksen kuvaus -dokumentti katselmoidaan. [21, s. 17-18]

Vielä ennen massatuotannon aloittamista luodaan ensimmäisen toimituserän tarkastusohjeet, jotka myös katselmoidaan. Tarkastusohjeiden tarkoituksena on varmistaa, että ensimmäiset massatuotantoerät ovat vaatimusten mukaisia. [21, s. 18-19]

Tuotannon aloittamisen jälkeen voidaan vielä suorittaa massatuotannon seurantakatselmus, jossa piirikortin tuotantovaiheet käydään läpi ja mahdolliset haasteet otetaan käsittelyyn, jolloin sekä piirikorttia että tuotantoprosessia voidaan muuttaa. Alla olevassa kaaviossa on kuvattu nykytilaisen prosessin vaiheet. [21, s. 20]



Kaavio 3. Nykytilaisen prosessin vaiheet suunnittelun aloituksesta massatuotantoon. [21, s. 21]

6 Piirikorttien suunnitteluprosessin nykytilan haasteet

6.1 Tuotantotestaus osana piirikorttien suunnitteluprosessia

Nykyinen piirikorttien suunnittelua ohjaava prosessikäsikirja kuvaa piirikorttitestausta vain hyvin ylätasolla. Prosessi vaatii, että piirikorttitestaus otetaan huomioon suunnittelussa, mutta ei anna konkreettisia vaatimuksia tai ohjeita lukuunottamatta yleisiä suunnittelusääntöjä liittyen mm. testipisteiden sijoitteluun ja käyttämättömiin piirien pinneihin. Piirikortin vaatimusmäärittely -dokumentti ei ohjaa vaatimusten luontia eikä vaatimusmäärittelyn tekoon ole erillistä ohjeistusta.

Suunnitteluprosessissa viitataan piirikorttien toiminnallinen kuvaus -dokumenttiin, jossa piirikortin testaus on huomioitu osana suunnittelua kappaleessa "Design for testability (DFT)". Piirikortin toiminnallinen kuvaus on kuitenkin luotu vasta piirikortin suunnittelun loppuvaiheessa, eikä sisällä mitään vaatimuksia, vaan on ainoastaan kuvaus piirikortin toiminnasta. Testerin suunnittelija voi käyttää piirikortin toimintaa kuvaavaa dokumenttia hyväksi testerisuunnittelussa, mutta dokumentti ei itsessään paranna piirikortin testattavuutta. DFT-kappaleen osalta ei ole vaatimuksia, kappaleessa ei ole valmiita esimerkkejä tai pakollisia kenttiä vaan ainoastaan maininta, että tässä kappaleessa voi kuvailla keinoja, joilla tuotantotestauksen kattavuutta voidaan parantaa.

Käytännössä piirikorteille on tehty erilaisia testausta helpottavia ominaisuuksia, sillä piirikortin suunnittelija ymmärtää testaustarpeen. Suunnittelijalla ei kuitenkaan välttämättä ole riittävää tuntemusta piirikorttien testauksesta tai alihankkijoiden testauskäytännöistä, jonka lisäksi mahdollisesti suunnittelijan vaihtuessa kesken projektin, on seuraavan suunnittelijan hankala jatkaa työtä. Suunnittelija ei myöskään voi käyttää resursseja tuotantotestauksen suunnitteluun, jos sitä ei ole projektissa huomioitu. [18]

6.2 Testauksen vaatimusmäärittely

Piirikorttien suunnitteluprosessi vaatii myös tuotantotestauksen vaatimusmäärittelyn, mutta kyseiselle dokumentille ei ole valmista pohjaa tai tarkempaa määrittelyä prosessissa, joka ohjaisi sisältöä tai ulkomuotoa. Jokainen hanke on luonut oman dokumentin, jonka ulkonäkö ja sisältö ovat täysin hankkeen vastuulla. Tästä johtuen

testimäärittelyt ovat paikoin hataria, viitteet piirikortin vaatimuksiin ovat puutteellisia, testirajat eivät ole yhteneviä piirikortin vaatimusmäärittelyn kanssa eivätkä eri hankkeiden tekemät dokumentit ole yhteneviä. [19]

Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, ettei testausta olisi hankkeen aikana otettu huomioon. Testauksen suunnittelu olisi kuitenkin ollut halvempaa, nopeampaa ja kattavampaa, jos se olisi jalkautettu osaksi suunnitteluprosessia. Tämän lisäksi testausmäärittelyt olisivat olleet vertailukelpoisia ja testaus olisi helposti siirrettävissä alihankkijalta toiselle. [20]

6.3 Testauksen toteutus

Alihankkija tai kolmas osapuoli suunnittelee ja valmistaa testilaitteiston hankkeen tekemän piirikortin testauksen vaatimusmäärittelyn pohjalta. Piirikortin suunnittelija on yleensä yhteydessä testerin suunnittelijaan testerin suunnittelun ja valmistuksen aikana. Testerin valmistaja kirjoittaa valmistetusta testeristä tuotantotestauksen kuvaus - dokumentin, joka kuvaa testerin ominaisuuksia ja toimintaa. Hanke katselmoi testausmäärittelyn ennen testilaitteiston hyväksymistä ja käyttöönottoa. Suunnitteluprosessi ei kuitenkaan vaadi itse testilaitteiston katselmointia tai validointia ennen käyttöönottoa.

6.4 Testaus massatuotantovaiheessa

Alihankkija ei toimita testatuista korteista testiraportteja kuin erikseen pyydettyäessä. Myöskään testituloksien elämistä testirajoissa ei seurata, vaan alihankkija on yhteydessä erikseen, jos heidän tuotannossaan hylätään poikkeuksellisen paljon kortteja, tai jos komponenttierien vaihtelut vaikuttavat saantoon.

6.5 Testereiden ylläpito

Tällä hetkellä alihankkijoilla olevista piirikorttien testilaitteistoista ei ole luetteloa. Vanhojen piirikorttien testisekvenssit tai edes testilaitteiston valmistaja eivät välttämättä ole tiedossa. Myös testereiden ja oheislaitteiden huolto- ja kalibroitivastuut ovat epäselvät. Jos testeriin liittyvät lisälaitteet ovat alihankkijan omaisuutta, alihankkija pääsääntöisesti kalibroi ne oman kalibroitikäytäntönsä mukaisesti.

Alihankkijat pystyvät itse tekemään perus huolto- ja korjaustoimenpiteitä:

- rikkoutuneiden testineulojen vaihdot ja puhdistukset

- kaapeleiden vaihdot
- rikkoutuneiden kaasujousien ja painintappien vaihto
- Yksinkertaiset testisekvenssien muutokset esim. yksittäisen testin ohitus.

Muissa tapauksissa tarvitaan usein testerinvalmistajan apua. Huoltosopimuksia tai testidatan seurantaa ei pääsääntöisesti ole, vaan toimiin ryhdytään, kun ongelmia ilmenee. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi, kun Windows-päivitys sekoittaa testilaitekannan, Boundary Scan- testien muutostarpeet, huono tuotannon saanto tai testattaviin piirikortteihin tehty muutokset, jotka vaikuttavat myös testaukseen. Testereiden ylläpito on tämän työn ulkopuolella, eikä sitä käsitellä tässä työssä.

7 Suunnitteluprosessin ja testausmäärittelyn kehittäminen

Jotta piirikorttien testaus olisi mahdollisimman kattavaa ja jotta testauksen suunnittelu olisi mahdollisimman nopeaa ja helppoa, on testaus otettava huomioon piirikortin suunnittelun alusta lähtien. Kun tuotantotestaus on oleellinen osa suunnitteluprosessia, se huomioidaan myös hankkeiden aikataulussa ja resurssisuunnittelussa. [6]

Osaksi suunnitteluprosessien kokonaisuutta luodaan uusi piirikorttien tuotantotestaukseen keskittynyt ohjeistus, joka ohjaa suunnittelijaa ottamaan myös testauksen huomioon. Seuraavissa kappaleissa etsitään keinoja testauksen sisällyttämiseksi suunnitteluprosessiin, sekä tunnistetaan testauksen vähimmäisvaatimukset.

7.1 Testaus osana piirikortin vaatimusmäärittelyä

Piirikortin suunnittelu aloitetaan vaatimusmäärittelyllä. Piirikortin vaatimusmäärittely tehdään käyttäen valmista vaatimusmäärittelypohjaa. Vaatimusmäärittely on siirtymässä pois manuaalisista taulukoista ja tekstidokumenteista järjestelmäsuunnitteluun erikoistuneeseen vaatimustenhallintajärjestelmään. Tässä järjestelmässä voidaan luoda joukko vaatimuksia, joita voidaan uudelleen käyttää missä tahansa hankkeessa. Näin ollen samalle asialle tehty vaatimukset ovat joka hankkeessa ja joka piirikortilla muotoiltu samoin. Järjestelmään luodaan uusi vaatimusmäärittelypohja sekä valmiita vaatimuksia, jotka ohjaavat työtä.

Testaus tulee ottaa huomioon jo piirikortin vaatimusmäärittelyä tehtäessä. Piirikortin vaatimusmäärittelyssä on tunnistettava piirikortin ominaisuudet, jotka on testattava. Uudessa vaatimustenhallintajärjestelmässä myös testaukseen liittyviä vaatimuksia voidaan tehdä valmiiksi, jolloin ne ovat automaattisesti vaatimusmäärittelyä tekevän suunnittelijan käytettävissä. Testauksen kannalta oleellisia vaatimuksia ovat mm. käyttöjännitteet, teholähteiden kuormat ja dataväylät kuten LVDS. Vaatimusmäärittelyssä asetetaan myös vaatimukset testipisteiden olemassaololle, koolle ja sijainnille. Vähintään kaikki käyttöjännitteet on oltava mitattavissa testipisteiden kautta. Tämän lisäksi vaatimusmäärittelyssä asetetaan vaatimukset piirikortin rajapinnoille, käytetyille liittimille ja merkkivaloille. Myös JTAG ja Boundary Scan sekä erilaiset piirikortin sisäiset ja itsenäiset testausominaisuudet on määriteltävä jo piirikortin vaatimusmäärittelyssä.

Piirikortin vaatimusmäärittelyssä asetetaan hyväksyttävä tulojännite, taajuus sekä virran raja-arvot. Myös piirikortilla olevien teholähteiden tuottamat käyttöjännitteet, niiden hyväksyttävät raja-arvot sekä virranantokyky määritetään. Jos piirikortille myöhemmin valitaan vaatimusta pienemmällä toleranssilla olevia komponentteja, voidaan testausmäärittelyssä vaatia piirikortin vaatimusmäärittelyä tiukempia raja-arvoja, jotta valittujen komponenttien oikea toiminta voidaan varmentaa.

Piirikortin tuotantotestauksen määrittely tulee aloittaa mahdollisimman pian piirikortin vaatimusmäärittelyn aloituksen jälkeen yhteistyössä mm. laiteohjelmistosuunnittelijan kanssa. Myös verifiointisuunnitelman suunnittelu aloitetaan heti piirikortin vaatimusmäärittelyn aloituksen jälkeen. Piirikorttien protosarjan testaussuunnitelma ja tuotantotestauksen määrittely sisältävät samankaltaisia testejä ja molemmat perustuvat piirikortin vaatimusmäärittelyyn. Nämä kaikki dokumentit päivittyvät suunnittelun edetessä; uusia vaatimuksia luodessa syntyy myös uusia testausvaatimuksia. Toisaalta testausta suunniteltaessa voidaan havaita myös tarve uusille piirikortin vaatimuksille.

7.1.1 Testauksen huomiointi piirikaaviossa

Piirikaaviota suunniteltaessa ei ainoastaan toteuteta piirikortin ja piirikortin testauksen asettamia vaatimuksia vaan myös havaitaan uusia ja jalostetaan aiempia vaatimuksia. Testaus tulee huomioida piirikaaviota tehdessä vähintään seuraavien asioiden osalta

- Kaikille sisääntuloille tulisi asettaa etuvastus, jos se vain on mahdollista, jolloin niihin voidaan liittää testerillä, esim. chip enable -signaali.

- Kaikille käyttöjännitteille ja toimintaa kuvaaville signaaleille tulisi lisätä diagnostiikkaledejä. LEDejä ei välttämättä tarvitse kalustaa massatuotantokorteille, sillä tuotantotestauksessa signaali voidaan mitata testipisteistä.
- Kaikki IC-piirien käyttämättömät yksiköt tulisi asettaa tunnettuun tilaan etuvastusten avulla. Myös piirien lähdöille tulisi asettaa ylös- / alasvetovastukset, jolloin niitä voidaan hallita testauksen aikana. Tämä mahdollistaa esimerkiksi piirin käyttämättömän yksikön testauksen, jolloin ei häiritä kortin muuta toimintaa
- Testipisteitä tulisi aina käyttää liittimien sijaan, jos se vain on mahdollista, tällöin liittimien kosketuspinnat pysyvät eheinä ja puhtaina.
- Käyttöjännitteille ja etenkin maatasoille tulisi lisätä paljon testipisteitä, jolloin virta jakaantuu testineulojen kesken ja päästään mahdollisimman lähelle mitattavan signaalin maatasoa.
- Jokaiselle mitattavalle signaalille tulisi olla oma testipiste mahdollisimman lähellä signaalin lähdettä
- Ohjelmoitaville ja hallittaville piireille tulisi olla omat huoltoliittimet
- JTAG -laitteet tulisi ketjuttaa. Joka JTAG -laitteelle testipisteet TDI-, TDO-, TCLK- ja TMS -pinneille.
 - o Huomioi myös tarvitaanko 0 ohm jumpperivastus JTAG bypass -pinniin, vastusta ei tarvitse kalustaa mutta juotospisteisiin voidaan liittyä testerillä.
 - o Käyttämättömät IC -pinnit tulisi asettaa vastuksen kautta käyttöjännitteisiin, jolloin niihin voidaan liittyä testerissä ja JTAG -piirien osalta voidaan käyttää valmiita JTAG-kirjastosta löytyviä testejä ilman erillistä ohjelmointia.
- Ulkoinen kello tulisi ajaa bufferin tai ANDin läpi, jolloin sitä voidaan hallita testauksessa.

Jo piirikaaviota tehdessä, mutta viimeistään osasijoittelun aikana tulee testausta suunnitella tiiviissä yhteistyössä piirikorttivalmistajan kanssa. [3; 7; 8; 14]

7.1.2 Testauksen huomiointi osasijoittelussa

Myös osasijoittelua tehdessä tulee huomioida jo tehdyt tuotantotestauksen vaatimukset. Samalla niitä voidaan jalostaa ja tarpeen mukaan luoda uusia suunnittelun edetessä. Osasijoittelua tehdessä on tärkeää huomioida testipisteiden koko, sijainti, kohdistusmerkit, kiinnitys- ja keskitysreiät, testauslaitteiston painintappien vaatima tila, sekä komponenttien korkeudet. Etenkin AOI- ja AXI -menetelmät saattavat vaatia kohdistusmerkkejä, jotta tarkastus voidaan tehdä luotettavasti.

Mahdollisimman monelle komponentille tehdään samanlainen juotosalueen kuvio, jolloin samaa kontaktineulaa voidaan tarvittaessa käyttää mahdollisimman monelle komponentille. Painintappeja tarvitaan useampia sellaisilla alueilla, joilla on paljon testipisteitä. Myös piirikortille tehdyt jyrinnät saattavat vaikuttaa piirikortin vahvuuteen ja näin testipisteiden ja painintappien sijoitteluun sekä määrään. Testipisteet tuleekin jakaa mahdollisimman tasaisesti kortille, mutta vain yhdelle puolelle, jolloin neulapedin piirikortille aiheuttama paine on mahdollisimman tasainen. Testipisteiden tulee olla vähintään 2,5 mm etäisyydellä toisistaan tai vieressä olevista juotospisteistä ja komponenteista. Testipisteen on oltava tarpeeksi suuri käytettyyn testineulaan nähden. Suositeltu testipisteen halkaisija on vähintään 1,25mm. Testipisteiden läheisyyteen tulee sijoittaa mahdollisimman matalia komponentteja, jotta testipisteisiin liittyminen on mahdollisimman helppoa. Testipisteiden on myös oltava puhtaita tinasta, juotteenestopinnoitteesta sekä silkipainosta.

Verkko- ja pienjännitteiset osat tulee erotella selkeästi kortin eri puolille. Diagnostiikkaledit sekä tärkeät silkipainot tulee sijoitella niin, että ne ovat nähtävissä myös täysin kalustetulla kortilla. Piirikortin pinnalle jätetään myös tilaa kortin sarjanumerotarralle, sekä tarvittaessa erilliselle testauksesta kertovalle tarralle. Piirikortin reunoille jätetään tyhjä alue, jolle ei sijoitella komponentteja, tällöin piirikortin käsittely ja asettelu erilaisiin testilaitteistoihin helpottuu. [3, kpl 53.9, 53.10 ;8 ; 9; 14]

7.1.3 Testauksen huomiointi piirikortin toiminnallinen kuvaus -dokumentissa

Piirikortin toiminnallinen kuvaus -dokumentti kuvaa piirikorttia ja sen toimintaa. Tämä dokumentin tulee sisältää myös selostus piirikortin sisäisistä ja itsenäisistä testausominaisuuksista, sekä miten niitä voidaan hallita. Tämän dokumentin tarkoitus on toimia apuna huollon, tuotekehityksen sekä piirikortin testauksen suunnittelijan työssä.

Toiminnallisen kuvauksen tulisi sisältää ainakin seuraavat osa-alueet:

- Testipisteiden koko, tiheys ja sijainti
- Ohjelmointi ja testausliittimet
- Diagnosointivalot
- Testattavat signaalit ja niiden testipisteet
- Boundary Scan -ominaisuudet
- ylös- ja alasvetovastukset
- Piirikortin HW-versio ja ID

- Piirikortilla sijaitsevat teholähteet, niiden jännitteet, toleranssit, virta, nominaaliteho käytön aikana
- Piirikorttilohkot, jotka tulee isoloida tai testata erikseen
- Piirikortin ulkoiset rajapinnat
- Itsenäiset testausominaisuudet (mm. jännitelähteiden power good -signaalit, ADC -tulot)
- Referenssijännitteet

7.2 Testauksen vaatimusmäärittely

Piirikortin tuotantotestauksen vaatimusmäärittelyn tekeminen tulee aloittaa yhdessä piirikortin verifiointisuunnitelman kanssa mahdollisimman pian piirikortin vaatimusmäärittelyn aloittamisen jälkeen. Sekä testausuunnitelma, että tuotantotestauksen vaatimusmäärittely sisältävät samankaltaisia testejä ja vaatimukset ovat pääsääntöisesti peräisin piirikortin vaatimusmäärittelystä. Tuotantotestauksen määrittely tulee tehdä yhteistyössä laiteohjelmointisuunnittelijoiden ja piirikortin valmistajan kanssa heti, kun piirikortin valmistaja on valittu.

Tuotantotestauksen määrittely tehdään käyttäen tuotantotestauksen vaatimusmäärittelypohjaa, joka on piirikortin vaatimusmäärittelyn tapaan vaatimustenhallintajärjestelmässä. Ote tuotantotestausmäärittelypohjan luonnoksesta on tämän työn liitteenä (Liite 1).

Tuotannon testausmäärittelyä ja testausohjeita luodessa on myös otettava huomioon, miten piirikortin laiteohjelmisto käynnistyy, kun kortti on kiinni testerissä ja häiriintyykö kortin toiminta kun testeri liittyy eri rajapintoihin.

7.2.1 Tuotantotestauksen vaatimusmäärittely ja protojen testaus

Ensimmäisten toiminnallistenpiirikorttiprotojen saapuessa ei tuotantotestausta välttämättä ole vielä otettu käyttöön. Tällöin protojen testausuunnitelman mukaisten testien tuloksia tulee verrata tuotantotestauksen vaatimusmäärittelyn vastaaviin testeihin, jolloin testien hyväksyntärajat voidaan varmentaa. Samalla voidaan myös varmentaa, että testaus on tarpeeksi kattava. Tuotantotestauksen vaatimusmäärittely tulee tarvittaessa päivittää ja kaikki muutokset tulee perustella.

7.3 Tuotantotestausvaatimusten luonti

Suurin osa tuotantotestauksen vaatimuksista perustuu piirikortin vaatimusmäärittelyyn. Kaikki toiminnalliset sähköiset ominaisuudet on testattava ennen kuin piirikortti voidaan asentaa laitteeseen ja lähettää asiakkaalle. Testaus on aina sitä halvempaa ja nopeampaa, mitä aiemmassa tuotantovaiheessa se voidaan tehdä.

7.3.1 Visuaalinen tarkastus

Kaikki piirikortit tulee tarkastaa visuaalisesti ennen sähköistä testausta. AOI- ja AXI-menetelmät ovat suositeltuja, sillä ne ovat sekä nopeita että oikein asetettuina luotettavia. AXI-tarkastus mahdollistaa myös komponenttien alla piilossa olevien juotosten tarkastuksen nopeasti. AXI-tarkastusta kannattaa käyttää aina, kun se on mahdollista. Komponenttien alla olevien juotosten tarkastus onnistuu ainoastaan AXI-menetelmällä. Tällöin myös mm. komponenttien jäähdytykseen käytettyjen alueiden juottuminen voidaan varmistaa. On myös huomioitava, että IPC-standardi ei ota kantaa komponenttien jäähdytykseen tarkoitettujen alueiden juottumiseen, vaan juotosten hyväksyntäkriteerit on sovittava erikseen piirikortin valmistajan kanssa. Kattava AOI- ja AXI-tarkastus vähentävät myöhemmin sähköisen testauksen tarvetta. Visuaalisessa tarkastuksessa tarkastetaan myös mm. jäähdytyssiilien ja muiden mekaanisten komponenttien oikea asennus ja puhtaus. Samoin piirikortin yleinen puhtaus kuten tinaroiskeet ja fluksijäämät tulee tarkastaa. [3, kpl 53.9, 53.10; 4]

7.3.2 Piirikortilla olevat tehrolähteet

Kaikki, sekä verkkosähköiset että toisiopuolen tehrolähteet, tulee testata. Kaikista jännitelähteistä tulee mitata ulostulojännitteet. On suositeltavaa mitata ulostulojännitteet sekä kortin ollessa lepotilassa että silloin, kun tehrolähteisiin on kytketty todellista käyttöä vastaavat kuormat. Jos jännitelähteen testauksessa käytetään ohmista kuormaa, ei virtaa yleensä tarvitse mitata, jos kuormitetun lähteen jännite mitataan. Tehrolähteiden nominaalikuormat on määritelty piirikortin vaatimusmäärittelyssä tai vähintään kuvattu piirikortin toimintaa kuvaavassa dokumentissa. Myös piirikortin sisääntulovirrat on suositeltavaa mitata, sillä liian korkeat tai matalat virrat kertovat oikosuluista, viallisista piireistä tai ohjelmointivioista.

Myös käytetty verkkojännite tulee huomioida. Suurinosa verkkosähköosia sisältävistä piirikorteista on suunniteltu toimimaan 115VAC – 230 VAC -jännitteillä, jolloin toleranssien ja IEC -standardivaatimusten puitteissa niiden on toimittava 89 VAC – 264VAC -välillä.

7.3.3 Boundary Scan

Boundary scan -testaus on helppo ja nopea tapa testata piirien sisäistä ja keskinäistä toimintaa. Boundary Scan -testauksella voidaan testata ylös- ja alasetovastukset, tarkistaa piirikortin HW-versio, rajapintojen tilat, tehdä muistitestejä, sekä luoda ja lukea sekä analogisia että digitaalisia herätteitä ja vasteita. Boundary Scan -testauksella voidaan vähentää tarvittavien testineulojen määrää ja nopeuttaa testausta huomattavasti. Boundary scan -testauksen tulee olla aina mahdollisimman kattava ja sen suunnittelu tulee tehdä tiiviissä yhteistyössä laiteohjelmoijien ja testerin suunnittelijan kanssa. Etenkin Boundary Scan -testauksen toteutuksen dokumentointi on tärkeää, jotta testien sisältö ja kattavuus on ymmärrettävissä myös tulevaisuudessa. [3, kpl 54-55; 5]

7.3.4 Ohjelmointi

Kaikki piirikortit tulee ohjelmoida niin pitkälle kuin mahdollista ja ohjelmointi tulee verifoida jo piirikortin valmistajalla. Jotkin testit saattavat vaatia erityisen testausohjelmiston, mutta testauksen lopuksi piirikortille tulee ladata tuotanto-ohjelmisto.

7.3.5 Muistit

Kaikki piirikortilla olevat muistit testataan mahdollisimman kattavasti. Usein testausaika on rajoitettu, jolloin myös testauksen kattavuus on rajattu. Muistitestit voidaan usein suorittaa piirikortin sisäisinä testeinä mm. Boundary Scannin avulla.

7.3.6 Piirikortin sisäiset testausominaisuudet

Piirikortin sisäiset testaus- ja diagnostiikkaominaisuudet tulee testata ja piirikortin HW-versio tarkistaa. Jos piirikortilla on analogisia sisääntuloja jännitteiden ja virtojen mittaamiseksi, tulee ne mitata, ja tuloksia verrataan aiemmin mitattuihin jännitteisiin. Suurin sallittu ero perustuu AD-muuntimen ja referenssijännitteiden tarkkuuteen. Myös teholahteiden power good -signaalit tulee tarkastaa sekä normaali että vikatilanteessa. [3, kpl 54-55; 5]

7.3.7 Sisäiset ja ulkoiset rajapinnat

Kaikki sisäiset datalinjat kuten LVDS tulee testata todellista käyttöä vastaavalla datavirralla. Ulkoiset rajapinnat kuten käyttöliittymät ja kommunikaatorajapinnat kuten Ethernet tulee testata mm. liitettävyyden ja nopeuden osalta.

7.3.8 Moottorit

Kaikki moottoriohjaimet on testattava. Askelmoottoritesteissä käytetään usein oikeita moottoreita, jotka voidaan varustaa enkooderilla, jonka avulla moottorin pyörimissuunta ja nopeus voidaan testattaessa tarkistaa sähköisesti. AC- ja DC-moottoreiden sijaan voidaan usein käyttää helposti myös keinokuormia. Myös jumittuminen, avoimenpiirin- sekä oikosulkutilanteet tulee huomioida.

7.3.9 Laserit ja turvakytkimet

Kaikki laserohjaimet, hätäseis-kytkimet, turvakytkinpiirit ja muut turvallisuuden kannalta kriittisiksi tunnistetut ominaisuudet on testattava. Nämä testit merkitään testauksen vaatimusmäärittelyyn kriittisiksi vaatimuksiksi, jotka on toteutettava.

7.3.10 Merkkivalot

Merkki- ja diagnosointivalojen toiminta tulee testata. Testaus voidaan tehdä joko visuaalisesti (manuaalisesti tai koneellisesti) tai elektronisesti, jolloin mitataan joko LEDin tai sen etuvastuksen yli olevaa jännitettä. Jopa LEDin väri voidaan usein päätellä pelkän mitatun jännitteen perusteella.

7.3.11 Muuta huomioitavaa

Tarkista onko kaikille pakollisille ja soveltuville vaatimuksille testausvaatimus. Vapaaehtoisille ja toteutumattomille vaatimuksille ei tehdä myöskään testausvaatimuksia.

Muita yleisiä testattavia ominaisuuksia ovat mm.

- lämpötila-mittaus, vertaa mitattua lämpötilaa testilaitteiston vertailulämpötilaan
- tuulettimen ohjaus

7.4 Hyväksyntärajojen asettaminen

Hyväksyntärajoja asetettaessa on otettava huomioon mm. käytettyjen kuormien toleranssit ja lämpötilariippuvuus. Kuormien toleranssit on joko otettava huomioon testausmäärittelyn hyväksyntä rajoissa, tai kuormavastukset on mitattava etukäteen. Kalibroidut elektroniset kuormat ovat vakaampia mutta myös kalliimpia kuin yksinkertaiset kuormavastukset.

Massatuotannossa olevien piirikorttien testitulokset saattavat poiketa laboratorioissa tehdyistä protomittauksista, sillä testilaitteistossa on mm. pitkät johtimet testineulojen ja mittalaitteiden välillä, jotka voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Tällöin testauksen raja-arvoja voidaan muuttaa, mutta kaikki muutokset tulee perustella tuotantotestauksen vaatimusmäärittelyyn.

Tämän lisäksi testitulokset voivat ajan saatossa ajautua raja-arvojen ulkopuolelle, joka voi viitata testineulojen, kytkentäreleiden tai muiden testilaitteiston osien kulumiseen, eikä välttämättä eri tuotantoeristä valmistuneen piirikortin jännitteiden vaihteluun. Tällöin testiarvoja ei tule korjata vain siirtämällä raja-arvoja, vaan muuttuneiden mittatulosten syy tulee selvittää ja juurisyy korjata.

7.5 Testerin suunnittelu, rakennus ja tuotantotestauksen toiminnallinen kuvaus

Kun piirikortin tuotantotestausmäärittely on tehty, aloitetaan piirikorttiterin suunnittelu yhdessä piirikorttitoimittajan tai kolmannen osapuolen kanssa. Kun piirikorttiteri on valmis, siitä luodaan tuotantotestauksen kuvaus -dokumentti, joka kuvaa testerin osat, sen toiminnan ja hyväksyntäraajat. Kaikki testit on kuvattava niin selkeästi, että niiden sisältö aukeaa ja sisällön ymmärtää myös henkilö, joka ei ole ollut kyseisen testerin kehityksessä mukana. Boundary Scan -testien sisältö jää helposti epäselväksi, sillä testiraportissa testi on yleensä vain joko "passed" tai "failed", eikä sen tarkempaa ymmärrettävässä muodossa olevaa tietoa ole saatavilla. Myös testiraportin tiedostomuoto ja tarvittavat työkalut sekä testiraportin lukemiseen, että testisekvenssien muokkaamiseen tulee kuvata dokumentissa. Dokumenttiin tulee kirjata myös testilaitteiston kalibroinneista ja päivityksistä vastaava taho. Tätä dokumenttia verrataan tuotantotestauksen määrittely -dokumenttiin ja kaikki poikkeamat tulee joko korjata tai perustella. Vähintään kaikki pakollisiksi määritellyt vaatimukset tulee olla toteutettu. Tuotantotestauksen toiminnalliseen kuvaukseen käytettävä dokumenttipohja on liitteenä 2.

7.6 Ensimmäiset tuotantosarjat ja tuotantotestauksen katselmointi

Tuotantotestauksen katselmoinnissa tulee tutkia ensimmäisten tuotantosarjojen testituloksia ja niiden asettumista testauksen hyväksyntärajoin. Usein sarjatuotannossa mitatut arvot hieman poikkeavat yksittäisistä laboratoriossa tehdyistä protokorttien mittaustuloksista. Tarvittaessa testauslaitteiston kuormia, mittauslaitteita ja hyväksyntärajoja voidaan säätää. Kaikki muutokset tulee perustella ja kirjata sekä tuotannon vaatimusmäärittelyyn, että testauksen toiminnalliseen kuvaukseen tulevaisuuden tarpeita varten.

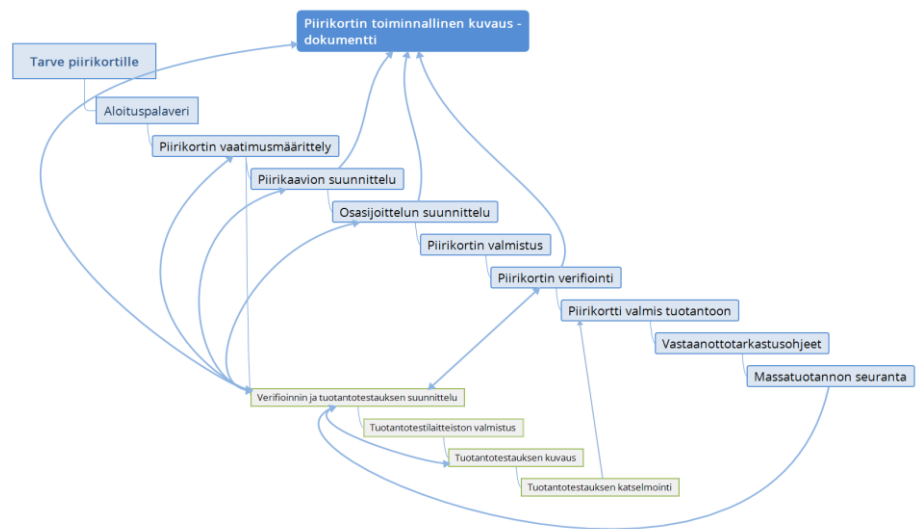
7.7 Testauksen seuranta massatuotantovaiheessa

On suositeltavaa kerätä ja analysoida säännöllisesti piirikorttien testituloksia, jotta testilaitteiston kulumista, huollontarvetta sekä komponenttien erävaihtelusta aiheutuvia muutoksia voidaan ennakoida. Myös jatkuva uudelleentestaus, jossa piirikortteja ajetaan testausohjelman läpi kunnes tulos on hyväksytty, kertovat joko väärinasetetuista hyväksyntärajoista, piilevistä juotos- tai komponenttivioista, tai ongelmista testerin toiminnassa.

7.8 Tuotantotestauksen päivitys vanhojen tuotteiden kohdalla

Vanhojen tuotteiden piirikorttien vaatimusmäärittelyt, testauksen vaatimusmäärittelyt, toiminnalliset kuvaukset sekä testereiden toiminnalliset kuvaukset vaihtelevat suuresti, eivätkä noudata yhtenäistä kaavaa. Vanhoissa tuotteissa ei pääsääntöisesti ole erillistä testauksen vaatimusmäärittelyä ja testauslaitteiston toiminnallista kuvausta, vaan ne on sisällytetty samaan dokumenttiin. Vanhojen tuotteiden osalta osa tai jopa kaikki dokumentit voivat myös puuttua kokonaan. Tällaisten tuotteiden kohdalla kannattaa harkita tarkasti tuottaako dokumenttien päivittäminen uuden prosessin mukaiseksi hyötyä. Piirikorteille ei enää tehdä suuria toiminnallisia, osasijoitteluun tai testaukseen liittyviä muutoksia, jolloin dokumenttien päivityksen hyödyt jäävät vähäisiksi.

Alla olevassa kaaviossa on havainnollistettu ehdotettujen kehitystoimien tuloksena syntyneen prosessin vaiheet, riippuvuudet ja viitteet:



Kaavio 3. Kehitetyn prosessin vaiheet suunnittelun aloituksesta massatuotantoon.

7.9 Testilaitteiston ylläpito

Testilaitteistojen ylläpitoa osana prosessia ei käsitellä tässä työssä. Kuitenkin viimeistään testilaitteiston käyttöönoton yhteydessä tulee sopia myös testilaitteiston ylläpidosta eli kuka vastaa kalibroinneista, testineulojen ja muiden kuluvien osien vaihdoista, piirikorttien FW -päivityksistä sekä testilaitteiston ohjelmisto päivityksistä, tai kehen otetaan yhteyttä ongelmatilanteessa ja miten ongelmaa aletaan ratkomaan

8 Yhteenveto

Aloittaessani työtä huhtikuussa 2018 olin työskennellyt useissa ylläpito-hankkeissa, joissa tavalla tai toisella muutettiin piirikortin testausta. Piirikorttien testaus ei ollut yleisesti suunnittelijoiden tiedossa, vaan testauksesta tiesivät vain tietyt testauksen parissa työskennelleet suunnittelijat. Myös piirikorttien testaukseen liittyvissä dokumenteissa oli havaittavissa useita kehityskohteita. Aluksi en tiennyt millainen työn alla olevan piirikortin testilaitteisto on, onko kyseessä vanhanaikainen "purkki", josta liitettiin testattavaan piirikorttiin liittimien kautta, vai nykyaikainen piikkipeti, joka sisälsi

myös mm. Boundary Scan -testejä. Piirikorttien testausta kuvaava dokumentti toimi yleensä myös testauksen vaatimusmäärittelyä.

Piirikorttien suunnitteluprosessikin ehti päivittyä tämän tutkimustyön teon aikana ainakin kahdesti: nyt piirikorttien testaukselle vaaditaan jo erillinen vaatimusmäärittely dokumentti, sekä aiempia dokumentteja vastaava testausta kuvaava dokumentti. Piirikorttien tuotantotestaukseen liittyville dokumenteille ei kuitenkaan ollut valmiita dokumenttipohjia, eikä niiden sisältöä käsitelty suunnitteluprosessin kuvauksessa. Myöskään viitteitä piirikortin vaatimusmäärittelyyn tai järjestelmätason vaatimuksiin ei vaadittu.

Työnkuvani vaihtui n. 1,5 vuotta sitten, jolloin siirryin piirikorttien ylläpidollisista tehtävistä palvelemaan uusia hankkeita sekä korkeajännitetuotantoa. Tuotantotestauksen merkitys ei kuitenkaan vähentynyt, sillä se on oleellinen osa jokaista piirikorttia jokaisessa sen elinkaaren vaiheessa. Tutustuin samalla myös tuoreen hankkeen dokumentaatioon, ja huomasin, että tuotantotestauksen dokumentoinnissa on edelleen kehitysmahdollisuuksia. Tuotantotestauksen vaatimukset eivät edelleenkään linkity ylätasoon vaatimuksiin, eivätkä kaikki tuotantotestauksen raja-arvot ole yhteneviä piirikortin toiminalliseen kuvaukseen. Tämän lisäksi hankkeen jäsenet joutuivat vielä tuotannon aloituksen jälkeen painimaan tuotantotestauksen haasteiden parissa.

Työssä onnistuttiin vastaamaan kysymykseen *Mitkä ovat nykyprosessin haasteet?* sekä tutkittiin *Miten testerit on tähän asti määritetty?* kappaleissa 5 ja 6. Luvussa 7 taas havaittiin useita kehitysmahdollisuuksia testauksen sisällyttämiseksi piirikorttien suunnitteluprosessiin sekä testereiden määrittelyyn. Työtehtävien muutos aiheutti katkoksen tämän työn tekemiseen, mutta samalla aihealue rajautui tarkemmaksi, jonka lisäksi jo suunnitteilla olleet suunnitteluprosessin muutokset ehtivät astua voimaan.

8.1 Jatkokehitys

Prosessin kehitys jatkuu yrityksessä. Piirikorttien suunnitteluprosessin tueksi tarkoitetun laatudokumentin kehittämistä jatketaan, jonka lisäksi pian käyttöön otettavaan vaatimustenhallintajärjestelmään luodaan tuotantotestauksen vaatimusmäärittely pohja, sekä valmiita esimerkkivaatimuksia. Laatudokumentti sekä uudet vaatimusmäärittelypohjat koulutetaan yrityksen koulutusmatriisiin mukaisesti. Uudet hankkeet käyttävät vaatimustenhallintajärjestelmää, valmiita dokumenttipohjia sekä valmiita esimerkkivaatimuksia piirikorttien sekä testauksen vaatimusten määrittelyyn. Jatkokehitystarpeita voidaan arvioida hankkeen edetessä, sekä viimeistään hankkeen

valmistuttua, jolloin piirikortit ovat massatuotannossa ja tuotantotestaus vaikeutunut. Myös hankkeiden jäseniltä saadaan palautetta, jonka perusteella prosessia voidaan edelleen jatkokehittää.

Lähteet

- 1 PCB Cart. Printed Circuit Boards Assembly (PCBA) Process. WWW-artikkeli. Luettu 16.09.2019.
- 2 mek. 2016. PowerSpector. PDF esite. Mek Europe BV.
- 3 Coombs Jr., Clyde F. 2008. Printed Circuits handbook. Sixth edition. McGraw-Hill.
- 4 Palokangas, Lasse. 2012. Tuotannon testauksen kehittäminen. Lopputyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu.
- 5 Balangue, Jun. 2017. Expanding IEEE Std 1149.1 Boundary-Scan Architecture Beyond Manufacturing Test of PCBA. PDF artikkeli. Keysight Technologies
- 6 Oresjo, Stig. A New Test Strategy For Complex Printed Circuit Board Assemblies. PDF Artikkel. Agilent Technologies Inc.
- 7 Parker, Kenneth P. 2000. System Issues in Boundary-Scan Board Test. PDF Artikkel. Agilent Technologies.
- 8 JJS Manufacturing. Design Guidelines for In-Circuit testability. PDF Artikkel. JJS Manufacturing.
- 9 Nguyen Thao; Rezvani Navid. 2008. Printed Circuit board assembly test process and design for testability. Network Appliance, INC. PDF artikkeli.
- 10 Moore, Timothy, J. 1994. A Test process optimization and cost modeling tool. Digital Equipment Corporation. PDF artikkeli.
- 11 Ho, Ron; Horowitz Mark. 2006. Design for Testability (Lecture 14). Stanford University: Computer Systems laboratory. PDF esitelmä.
- 12 Reinosa, Rosa, D. Manufacturing Test Strategy Cost Model. Hewlett-Packard Company. PDF Artikkel.
- 13 Verma, Amit. Designing Test Strategies for Modern PCB Assembly. Teradyne. PDF esitelmä.
- 14 CMP Media, Agilent Technologies. 2000. Complementary Test Strategies on High-Complexity boards. CMP Media INC.
- 15 Jyväskylän Yliopisto, Mitä Prosessit ovat? WWW-sivu, luettu 06.03.2020. <https://www.jyu.fi/laatua/ohjaus/prosessien-mallintaminen/mitaprosessitovat>
- 16 JUHTA. 2012. JHS152.
- 17 Irmeli Luukkonen, Juha Mykkänen, Timo Itälä, Saara Savolainen, Maarit Tamminen. Solea-Hanke, Itä-Suomen yliopisto, Aalto-yliopisto. Toiminnan ja prosessien mallintaminen. 2012.

- 18 Taneli Korhonen 2019, Senior Software Engineer, keskustelu 13.10.2019.
- 19 Joni Jalkanen 24.01.2020, tuotantotestaus dokumentaation katselmointitilaisuus. Muistio.
- 20 Joni Jalkanen 27.11.2019, elektroniikan katselmointitilaisuus. Muistio.
- 21 2018. Elektroniikan suunnitteluprosessi käsikirja. Yrityksen sisäinen laatudokumentti.
- 22 Joni Jalkanen 26.4.2017, Vierailu elektroniikan sopimusvalmistajan tehtaalla. Muistio
- 23 Labquality, 2.5 Validointi ja verifiointi. WWW-sivu, luettu 24.03.2020.
https://www.labquality.fi/vieritestisuositus/luotettava_vieritesti/validointi_verifiointi/

Piirikorttien tuotantotestauksen vaatimusmäärittely pohja

Ote piirikorttien tuotantotestauksen vaatimusmäärittelypohjasta, jossa jokainen vaatimus on yksilöity, ja jokaiselle vaatimukselle on viite piirikortin tai järjestelmätason vaatimukseen.

PCBA Testing Requirements

Requirement ID	REQ Class	Trace from SRS / HWRS	Description	Acceptance Criteria	References	Testing details		
						TP / conn.	FW / BSCAN	Other
1. General								
MFR-1.001	Mandatory	Most of the test requirements shall point to SRS or HWRS requirement	These are example test requirements to guide filling the template	Insert condition or measurement result which is considered as "passed"	Reference to the testing instructions or other documents	TP25	BS	n/a
MFR-1.002	Mandatory	HWRS-1.010	Boundary Scan shall be used for interconnection testing	BSCAN is used for interconnection testing		n/a	BS	n/a
MFR-1.003	Mandatory	HWRS-1.010	Boundary scan shall be used for Memory testing	BSCAN is used for memory testing		n/a	BS	n/a
MFR-1.004	Mandatory	HWRS-1.010	Tested and passed boards shall be labeled	Passed boards are labelled		n/a	BS	n/a
MFR-1.005	Mandatory	HWRS-1.008	Test results shall be stored to database	Test results are stored to database		n/a	n/a	n/a
MFR-1.006	Mandatory	HWRS-1.001	Board shall be visually inspected by AOI	No assembly or solder defects		n/a	n/a	n/a
MFR-1.007	Mandatory	HWRS-1.011	Board fixing holes XH1, XH3 shall be connected to CHGND at tester side	XH1, XH3 connected to CHGND at tester		n/a	n/a	n/a
MFR-1.008	Mandatory							

Piirikorttien tuotantotestauksen kuvaus – dokumenttipohja

1. INTRODUCTION

1.1 DOCUMENT PURPOSE

The purpose of this document is to act as a **production test description** for describing the HW testing activities of the [board] at the PCBA production. The content of this document is based on the manufacturing requirements of the [board].

1.2 GOALS FOR TESTING

The target is to verify PCBAs assembled by the sub-contractor are according to unit specifications.

1.3 DEFINITIONS, TERMINOLOGY AND ABBREVIATIONS

Abbreviation/Term	Definition
BoM	Bill of Materials
PCB	Printed Circuit Board
PCBA	Printer Circuit Board Assembly
MFR	Manufacturing requirements
UUT	Unit Under Test
AOI	Automatic Optical inspection
AXI	Automatic X-ray inspection

1.4 RELATED DOCUMENTS

List of the documents which are referred to in this document or which are otherwise related to this document, e.g. preliminary works, definition of requirements, specifications, etc.

#	Reference	Name	Version (At a time of approval)
1		Production test requirements	
2		Schematics	
3		PCB Artwork	
4		Bill of materials	

2. TEST ENVIRONMENT

Describe here the test environment and if calibrations are required. Specify also the calibration responsibility. Fill in the test equipment table below with all used equipment including PC, power supplies, multimeters, oscilloscope, IO channels, programming devices, test jig, needle bed, etc. Specify also the used testing software and software and/or stylesheets required to read the test reports.

2.1 TEST EQUIPMENT & CALIBRATION

Make	Model	Pcs	Calibrate	Description
		1	YES	24VDC <1A power supply
		1	YES	5VDC <1A power supply
		48	YES	DVM channels
		3	YES	IO channels
		1	NO	PC
National Instruments	Test Stand 2014	1	NO	PCBA tester software
Calibration responsibility:				

2.2 USED FIRMWARE

Describe here the firmware used in testing but also the firmware that is loaded to the board after testing if it differs from the testing firmware.

Image Name	Version (SVN #)	Description	Notes

3. FUNCTIONAL TESTS

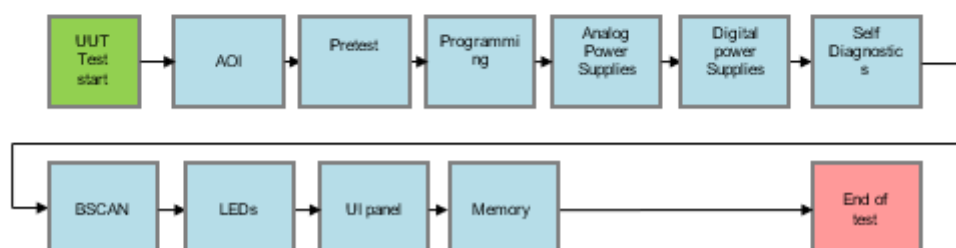
3.1 TEST SETUP

Describe how the UUT is connected to the tester and if the board needs any preparations. Describe also how the connection to MCU, FPGA and other devices are made.

The [board] is first installed to a test JIG which ensures proper orientation for AOI. The test jig is removed before electrical tests. Connection to the [board] is done with test needles, except for test case 3.5 which uses connector J2001.

3.2 TEST FLOW

Optional, but recommended for complex boards which require specific test order. Some of the test may need to be done before programming and some after it. Example flow below.



3.3 VISUAL INSPECTION

Test Description: <i>Describe why this test is done.</i> Visual inspection of the board before electrical testing to ensure correct assembly and proper soldering quality.		TC ID: 3.3
Test Procedure: <i>Briefly describe the test procedure.</i> Visually inspect the board for correct assembly and solder defects by AOI		
Test Step	REQ ID	Expected Result
1. Visually inspect the assembly by AOI	MFR-1.017	No assembly defects
2. Visually inspect the soldering quality by AOI	MFR-2.007	No soldering defects
Comments: N/A markings refer to test condition, preparation or action of tester unit. <i>Fill in the test steps, requirement ID from the Manufacturing requirements and expected result</i>		

3.4 STARTUP

Test Description: Describe why this test is done. Done in the beginning of the test to initialize the board.			TC ID: 3.4
Test Procedure: Briefly describe the test procedure. Connect +5V between TP4 and TP5 and measure current consumption.			
Test Step	REQ ID	Expected Result	
3. Connect 5VDC \pm 2% supply voltage between TP4 and TP5	MFR-1.019	N/A	
4. Measure 5VDC current consumption	MFR-3.002	-5 mA – 5 mA	
Comments: N/A markings refer to test condition, preparation or action of tester unit.			